

05

Поляризационно-зависимая филаментация фемтосекундных лазерных импульсов в синтетическом алмазе

© Г.К. Красин, Н.Г. Сцепуро, В.П. Мартовицкий, М.С. Ковалев

Физический институт им. П.Н. Лебедева,
119991 Москва, Россия
e-mail: krasin.georg@gmail.com

Поступила в редакцию 20.12.2021 г.
В окончательной редакции 20.12.2021 г.
Принята к публикации 30.12.2021 г.

Проведено исследование процесса филаментации внутри объема синтетического алмаза Па-типа с известной кристаллографической ориентацией в зависимости от состояния поляризации ультракоротких лазерных импульсов длительностью 300 fs и длиной волны 515 nm. Коэффициент пропускания образца измерялся с помощью фотодиода, а микроизображение филамента регистрировалось на КМОП-камере перпендикулярно оси распространения возбуждающего лазерного излучения. Зависимости коэффициента пропускания и длины филамента от азимута поляризации показывают отчетливую модуляцию на всем диапазоне его изменения.

Ключевые слова: ультракороткие лазерные импульсы, синтетический алмаз, фотолюминесценция, лазерная поляризация, нелинейное поглощение, широкозонные диэлектрики.

DOI: 10.21883/OS.2022.04.52263.61-21

Введение

В настоящее время стремительно развиваются инновационные методы характеристики оптически прозрачных материалов, в том числе определение оптических параметров материала, исследование его уникальных свойств, а также изучение различных дефектов в объеме. Поэтому при полноценном исследовании различных материалов появляется возможность контролируемой и высококачественной модификации материалов различными способами. Одним из перспективных для науки, техники и промышленности способов является модификация материала ультракороткими лазерными импульсами различной длительности. В рамках данного способа, очевидно, что эффективной технологией является нано- и микроструктурирование на поверхности [1–4] и в объеме материала с помощью прямой лазерной записи [5–9]. Эта технология позволяет записывать наноструктуры различной формы и конфигурации, производить дифракционные оптические элементы, генерировать микродефекты в объеме материала. Очевидно, что для корректной и качественной модификации поверхности/объема следует изучить различные механизмы взаимодействия лазерного излучения с материалом.

Хорошо известно, что взаимодействие материала с лазерным излучением зависит преимущественно от его характеристик — интенсивности, длины волны, частоты следования импульсов и их длительности, поляризации [10,11]. Чаще всего состояние поляризации излучения выбирается случайным образом или без обоснования, хотя оно может влиять на скорость фотоио-

низации вдоль разных кристаллографических направлений материала и сильно отличается из-за различной ширины запрещенной зоны в зоне Бриллюэна [12,13]. Известны работы [14–16], исследующие зависимость порога разрушения поверхности материала от состояния поляризации. В работах [17–19] исследовалось влияние состояния поляризации на фотовозбуждение кристаллических материалов: сапфира, кремния и алмаза с различными ориентациями. В качестве объемных эффектов исследовалось влияние различных состояний поляризации на процесс филаментации (в воздухе [20,21] и диэлектриках [22,23]).

Таким образом, поляризация является параметром лазерного излучения, который в силу высокой нелинейности фотовозбуждения может оказывать значительное влияние на проходящие процессы внутри объема кристаллов, в особенности в широкозонных алмазах. В настоящей статье изучался эффект влияния вращения азимута поляризации лазерных импульсов фемтосекундной длительности на процесс филаментации в объеме синтетического алмаза с ориентациями граней (001) и (110).

Экспериментальная часть

В настоящей работе использовалось излучение второй гармоники $\lambda = 515$ nm с линейным состоянием поляризации, генерируемое фемтосекундным лазером Satsuma. Длительность импульсов составила $\tau \approx 300$ fs, а энергия падающих на образец импульсов $E_{\max} = 250 \pm 1$ nJ в режиме TEM₀₀. Лазерное излучение фокусировалось в объеме алмаза с помощью микрообъектива (с числовой

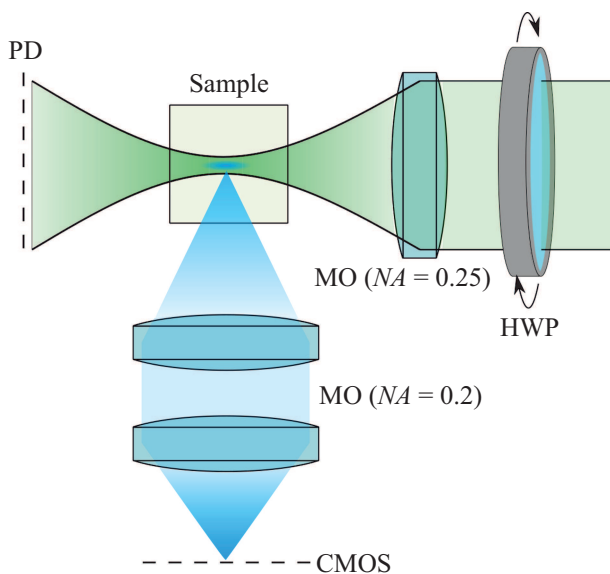


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: HWP — полуволновая пластинка, MO — микрообъектив, PD — фотоодиодный измеритель энергии, CMOS — КМОП-камера.

апертурой $NA = 0.25$) в пятно с радиусом $R_{1/e} \approx 2.1 \mu\text{m}$ (рис. 1). Азимут поляризации возбуждающего излучения изменялся в диапазоне $0-360^\circ$ с шагом 15° с помощью полуволновой пластинки, установленной перед микрообъективом. Образец представлял собой чистый синтетический алмаз с габаритами $1.5 \times 1.5 \times 3 \text{ mm}$, грани которого были предварительно отполированы до оптического качества поверхности. Основные кристаллографические ориентации (4 грани $\{110\}$ и 2 грани $\{001\}$) и направления в плоскостях алмаза были определены на установке рентгеновской дифракции Panalytical X'Pert Pro MRD Extended.

Излучение, прошедшее через алмаз, регистрировалось с помощью фотоодиодного сенсора (Ophir PD10-C, апертура 10 mm , спектральный диапазон $0.19-1.1 \mu\text{m}$, диапазон энергий $1 \text{ nJ}-15 \mu\text{J}$), который выступал в роли измерителя энергии импульсов. Далее образец убирался, и измерялась энергия, падающая на образец. Затем рассчитывались относительные значения коэффициента пропускания образца в зависимости от состояния поляризации. Погрешность измерения энергии с помощью фотоодиодного сенсора составила 0.5% . Визуализация области фотолюминесценции (ФЛ) производилась перпендикулярно оси распространения лазерных импульсов при помощи кварц-флюоритового микрообъектива (с числовой апертурой $NA = 0.2$) и КМОП-камеры (монохромная КМОП-камера Thorlabs CS2100M-USB, разрешение 1920×1080 , размер пиксела $5.04 \mu\text{m}$ и динамический диапазон до 87 dB). Для получения стабильного микроизображения филамента на камере частота следования импульсов в экспериментах составляла 100 kHz .

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для изучения влияния азимута поляризации возбуждающего излучения на процесс филаментации предварительно были проведены измерения коэффициента пропускания фемтосекундных импульсов, сфокусированных на глубине $500 \mu\text{m}$, через синтетический CVD-алмаз. Излучение заводилось внутрь алмаза через грань (001) , которая является гранью 4-й степени симметрии, поэтому при постройке азимутальных зависимостей в полярных координатах можно ожидать четырехлепестковые поляризационные диаграммы [24,25]. Действительно, на рис. 2, *a* отчетливо прослеживается азимутальная модуляция пропускания через образец с предельным отклонением в пропускании, составляющим $\sim 11\%$ от максимального значения.

Одновременно с регистрацией пропускания образца проводилась визуализация ФЛ под прямым углом, где были зарегистрированы микроизображения филамента на монохромной КМОП-камере. Филаментация начинается, когда мощность излучения превышает критическую мощность самофокусировки материала, которая для алмаза принимает значения в диапазоне $P_{cr} = 0.4-2 \text{ MW}$ для видимых и ИК лазерных импульсов [26]. Для исследования процесса филаментации были измерены и построены в полярных координатах зависимости длины филамента (рис. 2, *b*), а также смещения максимума интенсивности филамента относительно начального положения в сторону геометрического фокуса (рис. 2, *c*). Как можно наблюдать из графиков, эти зависимости также имеют 4-лепестковое распределение. Наблюдаемые зависимости пропускания и длины филамента находятся в противофазе, поскольку возбуждение ФЛ обеспечивается внутренним нелинейным поглощением алмаза. Соответственно в зонах с минимальным коэффициентом пропускания наблюдается максимум ФЛ и наоборот (при данной интенсивности фемтосекундных импульсов).

Полученные азимутальные зависимости можно связать с изменением критической мощности самофокусировки в объеме алмаза при вращении азимута поляризации фемтосекундных лазерных импульсов и ориентации вектора поляризации относительно различных направлений в зоне Бриллюэна. Так, для начального положения (0°) поглощение является максимальным для данной ориентации кристалла, область, в которой образуется филамент, является наибольшей, и сам филамент начинается ближе к границе раздела сред навстречу возбуждающему излучению. Далее, при изменении азимута вплоть до 45° наблюдается падение поглощения и, как следствие, уменьшение длины филамента с его последующим укорочением в направлении геометрического фокуса в глубине алмаза. Таким образом, управляя азимутом поляризации фемтосекундных импульсов, можно эффективно управлять нелинейностью фотозвозбуждения в соответствующей области зонного спектра и, как следствие, процессом филаментации.

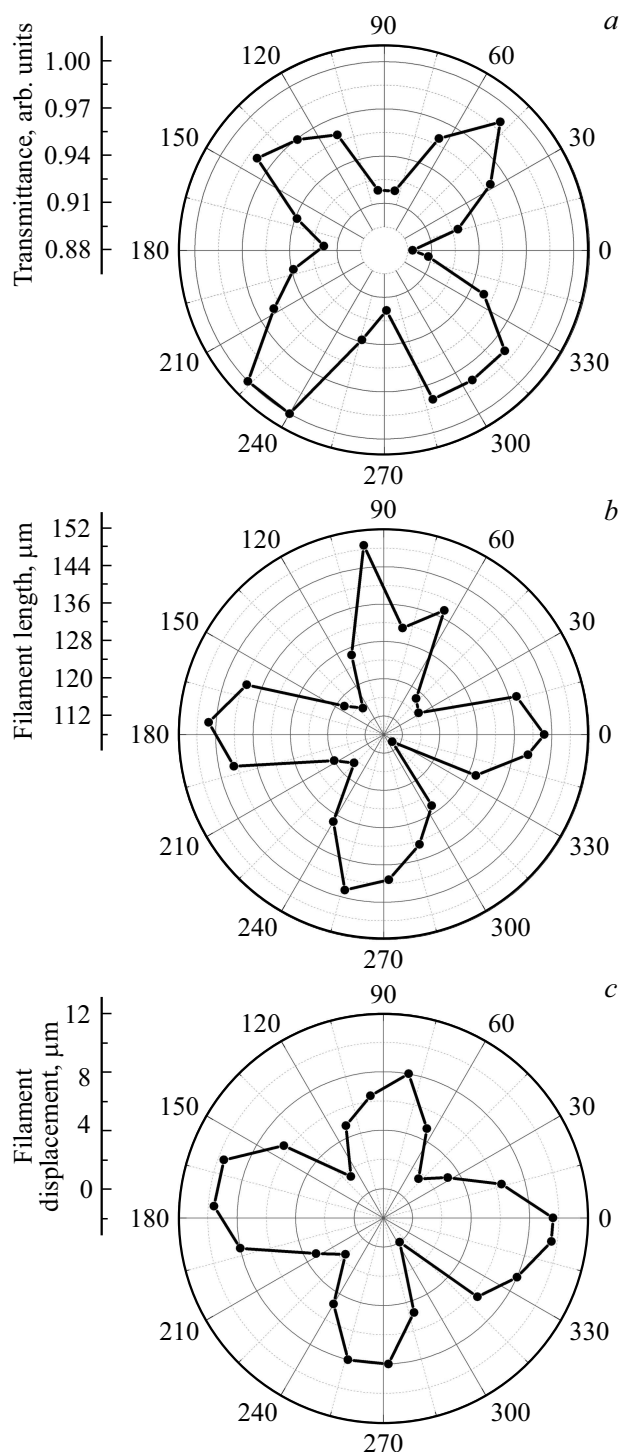


Рис. 2. Азимутальные зависимости коэффициента пропускания образца (а), длины филамента (б) и смещения максимума филамента вдоль оси распространения излучения в направлении геометрического фокуса (с), представленные в полярных координатах.

Заключение

В результате исследования процесса филаментации внутри объема синтетического алмаза Па-типа были

получены зависимости коэффициента пропускания образца и длины филамента от азимута поляризации ультракоротких лазерных импульсов длительностью 300 fs на длине волны 515 nm. Эти зависимости образуют четырехлепестковые поляризационные диаграммы, которые согласуются со степенью симметрии оси (4 порядка), через которую производилось возбуждение ФЛ и измерялось пропускание. Полученные зависимости связываются с изменением критической мощности самофокусировки в объеме синтетического алмаза при изменении лазерной поляризации и ориентации вектора излучения относительно различных направлений в зоне Бриллюэна.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30063).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.J. Traverso, J. Huang, T. Peyronel, G. Yang, T.G. Tietze, M.H. Mikkelsen. *Optica*, **8** (2), 202 (2021). DOI: 10.1364/OPTICA.400731
- [2] V. Kesaev, A. Nastulyavichus, S. Kudryashov, M. Kovalev, N. Stsepuro, G. Krasin. *Opt. Mater. Express*, **11** (7), 1971 (2021). DOI: 10.1364/OME.428047
- [3] S.I. Kudryashov, T. Pflug, N.I. Busleev, M. Olbrich, A. Horn, M.S. Kovalev, N.G. Stsepuro. *Opt. Mater. Express*, **11** (1), 1 (2021). DOI: 10.1364/OME.412790
- [4] R. Zazo, J. Solis, J.A. Sanchez-Gil, R. Ariza, R. Serna, J. Siegel. *Appl. Surf. Sci.*, **520**, 146307 (2020). DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146307
- [5] B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tünnermann. *Appl. Phys. A*, **63**, 109 (1996). DOI: 10.1007/BF01567637
- [6] C. Liu, X.L. Mao, S.S. Mao, X. Zeng, R. Greif, R.E. Russo. *Anal. Chem.*, **76** (2), 379 (2004). DOI: 10.1021/ac035040a
- [7] K.-H. Leitz, B. Redlingshofer, Y. Reg, A. Otto, M. Schmidt. *Phys. Procedia*, **12** (B), 230 (2011). DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.128
- [8] A.A. Kuchmizhak, A.P. Porfirev, S.A. Syubaev, P.A. Danilov, A.A. Ionin, O.B. Vitrik, Yu.N. Kulchin, S.N. Khonina, S.I. Kudryashov. *Opt. Lett.*, **42** (14), 2838 (2017). DOI: 10.1364/OL.42.002838
- [9] A.E. Рупасов, П.А. Данилов, М.П. Смаев, М.С. Ковалёв, А.С. Золотко, А.А. Ионин, С.И. Кудряшов. *Опт. и спектр.*, **128** (7), 918 (2020). DOI: 10.21883/OS.2020.07.49564.48-20 [A.E. Rupasov, P.A. Danilov, M.P. Smaev, M.S. Kovalev, A.S. Zolot'ko, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov. *Opt. Spectr.*, **128**, 928 (2020). DOI: 10.1134/S0030400X20070188].
- [10] P. Balling, J. Schou. *Rep. Prog. Phys.*, **76**, 036502 (2013). DOI: 10.1088/0034-4885/76/3/036502

- [11] Д.А. Заярный, А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, С.В. Макаров, А.А. Кучмижак, О.Б. Витрик, Ю.Н. Кульчин. Письма в ЖЭТФ, **103** (12), 846 (2016). [D.A. Zayarny, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, S.V. Makarov, A.A. Kuchmizhak, O.B. Vitrik, Yu.N. Kulchin. JETP Lett., **103** (12), 752 (2016). DOI: 10.1134/S0021364016120158].
- [12] D.J. Little, M. Ams, P. Dekker, G.D. Marshall, J.M. Dawes, M.J. Withford. Opt. Express, **16** (24), 20029 (2008). DOI: 10.1364/OE.16.020029
- [13] V.V. Temnov, K. Sokolowski-Tinten, P. Zhou, A. El-Khamhawy, D. von der Linde. Phys. Rev. Lett., **97**, 23 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.237403
- [14] A.P. Joglekar, H. Liu, E. Meyhöfer, G. Mourou, A.J. Hunt. PNAS, **101** (16), 5856 (2004). DOI: 10.1073/pnas.0307470101
- [15] D. Liu, Y. Li, M. Liu, H. Yang, Q. Gong. Appl. Phys. B, **91**, 597 (2008). DOI: 10.1007/s00340-008-3022-6
- [16] L.A. Lompre, G. Mainfray, C. Manus, J. Thebault. Phys. Rev. A, **15** (4), 1604 (1977). DOI: 10.1103/PhysRevA.15.1604
- [17] Q. Wen, P. Zhang, G. Cheng, F. Jiang, X. Lu. Ceram. Int., **45** (17), 23501 (2019). DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.08.056
- [18] X. Zhang, L. Zhang, S. Mironov, R. Xiao, L. Guo, T. Huang. Appl. Phys. A, **127**, 196 (2021). DOI: 10.1007/s00339-021-04341-y
- [19] Г.К. Красин, М.С. Ковалев, П.А. Данилов, Н.Г. Сцепуро, Е.А. Олейничук, С.А. Бибишева, В.П. Мартовицкий, С.И. Кудряшов. Письма в ЖЭТФ, **114** (3), 147 (2021). DOI: 10.31857/S1234567821150015 [G.K. Krasin, M.S. Kovalev, P.A. Danilov, N.G. Stsepuro, E.A. Oleynichuk, S.A. Bibicheva, S.I. Kudryashov. JETP Lett., **114** (3), 117 (2021). DOI: 10.1134/S0021364021150054].
- [20] Z. Zhu, T.-J. Wang, Y. Liu, N. Chen, H. Zhang, H. Sun, H. Guo, J. Zhang, X. Zhang, G. Li, C. Liu, Z. Zeng, J. Liu, S.L. Chin, R. Li, Z. Xu. Chin. Opt. Lett., **16** (7), 073201 (2018). DOI: 10.3788/COL201816.073201
- [21] S. Mitryukovskiy, Y. Liu, P. Ding, A. Houard, A. Couairon, A. Mysyrowicz. Phys. Rev. Lett., **114**, 063003 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.063003
- [22] J. Chang, R. Zhu, T. Xi, M. Xu, D. Wang, L. Zhang, D. Li, Z. Hao. Chin. Opt. Lett., **17** (12), 123201 (2019). DOI: 10.3788/COL201917.123201
- [23] M.M. Brundavanam, P.K. Velpula, N.R. Desai. In: *Proc. of Tenth Int. Conf. on Fiber Optics and Photonics* (SPIE, 2011), **8173**, 81730P. DOI: 10.1117/12.897913
- [24] K. Kobashi. *Diamond films: chemical vapor deposition for oriented and heteroepitaxial growth, 1st ed.* (Elsevier, 2005). DOI: 10.1016/B978-0-08-044723-0.X5000-4
- [25] П.П. Феофилов. УФН, **58** (1), 69 (1956). DOI: 10.3367/UFNr.0058.195601c.0069.
- [26] S.I. Kudryashov, A.O. Levchenko, P.A. Danilov, N.A. Smirnov, A.A. Ionin. Opt. Lett., **45** (7), 2026 (2020). DOI: 10.1364/OL.389348